اثر مقدار پودر گرافیت در پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد روی ریزساختار و خواص جوش زیرپودری چدن نشکن*

مقاله پژوهشی

بهرام غضنفریان[۱]		کامران داداش‌نیا[۲]		سید ابراهیم وحدت[۳]

چکیده

استفاده از پودرهای محافظ در جوشکاری زیرپودری یکی از روش‌های محافظت از حوضچهٔ جوش است، در این پژوهش، تلاش بر آن است تا از سربارهٔ کورهٔ پاتیلی فولاد به‌عنوان جایگزینی برای پودر محافظ جوشکاری چدن نشکن استفاده شود. به همین منظور، سختی و حداکثر استحکام کششی چدن نشکن قبل و بعد از جوشکاری زیرپودری با پودرهای محافظ حاوی صفر تا ۲۵ درصد وزنی گرافیت و ۱۰۰ تا ۷۵ درصد وزنی پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد مقایسه شده است. نتایج حاکی از این است که با افزایش مقدار پودر گرافیت در پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد، کیفیت جوش بهتر می‌شود، زیرا حداکثر استحکام کششی فلز جوشکاری زیرپودری شده به حداکثر استحکام کششی چدن نشکن شاهد نزدیک‌تر می‌شود. به‌علاوه، با افزایش مقدار پودر گرافیت در پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد، سختی فلز جوشکاری زیرپودری شده رابطهٔ مستقیم با مقدار پودر گرافیت در پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی دارد.

واژه‌های کلیدی سختی، حداکثر استحکام کششی، اتصال‌دهی، توسعهٔ پایدار.

Effect of the Content of Graphite in the Slag Powder of the Steel LRF on the Microstructure and Properties of SAW of Ductile Iron

B. Ghazanfarian		K. Dadashnia		S. E. Vahdat

Abstract

The use of protective powders in submerged arc welding (SAW) is one of the methods for protecting the Welding pool. In this research, it has been attempted to use ladle refining furnaces (LRF) slag as an alternative to a ductile cast iron shielding powder. For this purpose, the hardness and maximum tensile strength of the ductile iron before and after the SAW with protective powders including from 0 to 25 wt% of graphite and 100 to 75 wt% of the LRF slag powder have been compared. The results show that the welding quality is improved by increasing the amount of graphite powder in the powder of the LRF, because the maximum tensile strength of the welded metal is nearly the maximum tensile strength of the non-welded cast iron (control specimen). Also, the amount of graphite powder in the slag powder of the LRF has the straight relation with the hardness of the welding metal.

Key Words Hardness, UTS, Joining, Sustainable Development.

* تاریخ دریافت مقاله۹۸/۹/۱۲ تاریخ پذیرش آن ۹۹/۱/۱۶ می‌باشد.

(۱) کارشناس‌ارشد جوشکاری، دانشکده مهندسی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس.

(۲) کارشناس ذوب فلزات، دانشکده مهندسی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل.

(۳) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل.

Email: e.vahdat@iauamol.ac.ir

DOI: 10.22067/jmme.2021.40015

مقدمه

به‌طورکلی چدن‌ها قابلیت جوش‌پذیری ندارند. یعنی هنگام یا بعد از جوشکاری، فلز جوش یا کنار آن، ترک برمی‌دارد و موجب انهدام قطعه می‌شود. دلیل این مسئله به وجود گرافیت‌ها با گوشه تیز (گرافیت‌های ورقه‌ای) نسبت داده شده است. زیرا گرافیت‌ها فاز نرم هستند، بنابراین مانند ترک رفتار می‌کنند و هنگام اعمال تنش (حرارتی یا مکانیکی)، تمرکز تنش حاصل از مکان‌های تیز گرافیت، موجب شکست زودرس قطعه می‌شود [1]. حتی چدن‌های حاوی گرافیت فاقد لبهٔ تیز، مانند گرافیت کروی (در چدن داکتیل) و گرافیت برفی شکل یا گرافیت تمپرشده (در چدن چکشخوار) از این امر مستثنا نیستند زیرا بعد از جوشکاری، شکل گرافیت کروی و گرافیت برفی‌شکل به گرافیت ورقه‌ای تغییر می‌یابد، بنابراین در محل جوش یا کنار آن، تمرکز تنش خواهیم داشت. به همین دلیل در جوشکاری‌های ذوبی، تمهیدات مختلفی برای جوشکاری چدن نشکن و چکشخوار در نظر گرفته می‌شود که پیش‌گرم‌کردن و استفاده از مفتول مخصوص (حاوی عناصر کروی‌کننده گرافیت و گوگردزدا) از این جمله هستند تا نهایتا، شکل گرافیت قبل و بعد از جوشکاری در فلز جوش و در کنار جوش و در فلز پایه یکسان باشد [2].

به‌علاوه، صنعت فولاد یک صنعت راهبردی برای هر کشوری محسوب می‌شود و از اهمیت خاصی برخوردار است. با وجود این در کنار تولید این محصول ارزشمند، محصولات فرعی و جانبی هم تولید می‌شود که درنهایت به‌صورت ضایعات، دفع و انباشت می‌شود. یکی از ضایعات اصلی این محصول، سربارهٔ فولاد است [۳]. به‌ازای هر تن فولاد تولیدشده، ۲ کیلوگرم سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی (Ladle Refining Furnaces = LRF or LF) به‌عنوان ضایعات به‌دست می‌آید که با قیمت کیلویی ۲۴ تومان برای ساخت انواع عایق‌های پشم سرباره و استفاده در مخلوط آسفالت به‌کار می‌رود. از طرف دیگر، این ماده می‌تواند جایگزین مناسبی برای پودر محافظ در روش جوشکاری زیرپودری با قیمت هر کیلو ۸۲ تومان باشد. بنابراین، استفاده از ضایعات در صنایع راهبردی که وابسته به منابع خارجی هستند، گام مهمی در خودکفایی و توسعهٔ پایدار کشور محسوب می‌شود[٤].

بازیافت سربارهٔ حاصل از جوشکاری زیرپودری به‌عنوان فلاکس و تأثیر آن روی ترکیب شیمیایی، شکل دانه و ریزساختار فلز جوش نشان داد که پایداری قوس و توانایی جداشدن سرباره از روی سطح جوش قابل قبول بوده است. بنابراین، در جوشکاری زیرپودری استفاده مجدد از سرباره روی شکل دانه و ریز ساختار فلز جوش تغییرات قابل توجهی ایجاد نکرده است. به‌طوری که پس از خردکردن، می‌توان سرباره را به‌عنوان فلاکس استفاده کرد[٥]. مطالعه روی مخلوط سربارهٔ حاصل از جوش زیرپودری با فلاکس جوشکاری نو روی ترکیب شیمیایی و سختی سطحی و ریزساختار فلز جوش نشان داد که با خردکردن سربارهٔ حاصل از جوش زیرپودری و مخلوط‌کردن آن با فلاکس جدید می‌توان مجددا از آن برای جوشکاری زیرپودری استفاده کرد. بنابراین، در روش زیرپودری، کیفیت جوشکاری، حساسیت زیادی نسبت به بازیافت پودر محافظ ندارد.

مرندی و همکاران [6] نشان دادند که استفاده از مواد ضایعاتی مانند سربارهٔ کوره ذوب آهن و مواد پلیمری موجب افزایش مقاومت کششی و فشاری آسفالت می‌شود. مطالعه روی کابرد سربارهٔ فولاد کورهٔ قوس الکتریک در روسازی راه نشان داد که مخلوط‌کردن آسفالت با سربارهٔ فولاد، استقامت آسفالت را زیاد می‌کند و باعث می‌شود که لایهٔ رویهٔ آسفالت در برابر لغزش مقاوم شود. همچنین، سربارهٔ فولاد حرارت را به‌خوبی در خود نگه می‌دارد و تراکم‌پذیری مناسبی به آسفالت می‌دهد[۷]. مطالعه روی کاربرد سربارهٔ فولاد در مخلوط‌های آسفالت با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای نشان داد که مخلوط آسفالت حاوی سربارهٔ فولاد نسبت به مخلوط حاوی مصالح سیلیس، مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد و از آن می‌توان در مکان‌های با رطوبت زیاد استفاده کرد [۸]. به‌علاوه، استفاده از مواد ضایعاتی مانند سربارهٔ کورهٔ ذوب آهن و مواد پلیمری موجب افزایش مقاومت کششی و فشاری

آسفالت می‌شود [۹]. گسترش روزافزون پروژه‌های عمرانی و محدودبودن معادن سنگی، چالشی مهم برای دستیابی به توسعهٔ پایدار است. استفاده از سربارهٔ کارخانهٔ فولاد مبارکهٔ اصفهان به‌عنوان جایگزین سنگ‌دانه‌های درشت بتن برای ساخت مخلوط‌های بتن پرمقاومت یک راهکار اساسی است. مطالعه دربارهٔ اصلاح قیر و آسفالت با هدف بهبود مشخصات و عملکرد آن‌ها با استفاده از افزودنی‌های مختلف نشان داد که ترکیب دو مادهٔ بازیافتی پودر لاستیک و پودر سربارهٔ کورهٔ آهن با مقادیر مختلف برای اصلاح قیر و آسفالت، اثر منفی روی خواص آسفالت ندارد، درحالی‌که استفاده مجدد از خرده لاستیک و سربارهٔ کورهٔ آهن سبب جمع‌آوری آن‌ها از طبیعت می‌شود و بنابراین فواید زیست‌محیطی بسیاری به‌دنبال دارد [۱۰].

در این پژوهش از روش جوشـــکاری زیرپودری که اتوماتیک بوده و بنابراین از ســـرعت تولید بالا و یکنواختی کیفیت فلز جوش برخوردار ا ست، ا ستفاده می شود. به این ترتیب، مقادیر مختلف پودر گرافیت به پودر حاصـــل از سربارهٔ تصفیهٔ فولاد اضافه‌شده تا پس از آزمون‌های مکانیکی و مطالعهٔ ریز ساختار م شخص شود که برای حفظ خواص محصول پس از جو شکاری زیرپودری چدن نشکن، حداقل پودر گرافیت مورد نیاز برای اختلاط با پودر سربارهٔ ت صفیهٔ فولاد چه مقدار است.

مواد و روش تحقیق

سربارهٔ فولادسازی ترکیبی غیرفلزی است که دارای سیلیکات‌های کلسیم، اکسیدان‌های آهن، آلومینیم، منگنز، کلسیم و منیزیم است که با افزودن مواد سرباره‌ساز و مواد احیاکننده، درون پاتیل تولید می‌شود. برای تصفیهٔ مذاب فولاد (گوگردزدایی)، سرباره باید از بازیسته مناسب (بین ۲ تا ٤) برخوردار باشد و به‌علاوه، سرباره باید احیایی باشد یعنی FeO+MnO<1%، بنابراین خطر اکسیداسیون حوضچهٔ مذاب در اثر ترکیب با سرباره وجود ندارد و نیازی به صرف هزینه برای احیاکردن سرباره نیست [۱۱]. بنابراین، مطابق جدول (۱)، آنالیز شیمیایی فلاکس مدنظر در پژوهش حاضر (آلومینات روتیلی آگلومره) در روش جوشکاری زیرپودری با آنالیز شیمیایی سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی نزدیک بوده و در صورت استفاده از سربارهٔ مذکور قاعدتا می‌بایست آنالیز حوضچهٔ جوش و کیفیت جوش و اتصال ایجادشده در حد پذیرش باشد.

در این پژوهش، پودر گرافیت و پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد از شرکت فولاد هرمزگان با مشخصات مندرج در جدول (۱) تهیه شد. چدن نشکن با ترکیب شیمیایی و مشخصات مندرج در جدول (۲) به‌روش ریخته‌گری در وای بلوک (شکل ۱) در شرکت فولادین ذوب آمل ساخته شد و سپس با استفاده از دستگاه وایرکات سی‌ان‌سی در شرکت یکتاصنعت، نمونه‌های آزمون کشش مطابق شکل (۲)، آماده شد. برای مشخص‌شدن نوع گرافیت و تعیین ندول گرافیت، ریزساختار چدن ریخته‌گری‌شده (خام) در شکل (۳) به نمایش گذاشته شده است.

جوشکاری زیرپودری با دستگاه جوشکاری زیرپودری گام الکتریک مدل G2310 با شدت جریان ٤٥۰ آمپر و سرعت ٥٦۰ میلی‌متر بر دقیقه در فاصلهٔ ٥ میلی‌متری از مفتول جوشکاری به قطر ۳ میلی‌متر با ترکیب شیمیایی مطابق جدول (۳) انجام شد. قبل و بعد از جوشکاری در دمای بین ۲۲ تا ۲٥ درجهٔ سانتی‌گراد و در رطوبت نسبی بین ۳٥ تا ٤۰ درصد، استحکام کششی اندازه‌گیری شد. با کمک دستگاه سختی‌سنج ویکرز با نیروی فروروندهٔ هرم الماسه برابر با ۰/۳ و ۱ کیلوگرم (حداکثر قطر فرورونده ۰/۱ میلی‌متر بود) مطابق با استاندارد ASTM E384-17[۱۲]، آزمون سختی از سه ناحیهٔ جوش سه مرتبه انجام شد. ریزساختار سه ناحیه با کمک میکروسکپ الکترونی روبشی میدان نشری (Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)) TESCAN MIRA3 مطالعه شد. برای اطمینان از صحت نتایج، تمام آزمون‌ها در آزمایشگاه‌های همکار اداره استاندارد ایران انجام شد. مراحل انجام پژوهش در شکل (٤) آورده شده است.

جدول ۱ مقایسهٔ ترکیب، اندازهٔ ذرات و بازیسیتهٔ پودر جوشکاری و پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد

پودر	نام ترکیب								
پودر جوشکاری	نام ترکیب	CaF2		Al2O3 +MnO	CaO +MgO	SiO2 +TiO2	بازیسیته*	اندازهٔ ذرات	چگالی g/cm3
	محدودهٔ مقدار	۵تا۳۰٪		۲۰تا۵۵٪	۳۰تا۵۵٪	۱۰تا۲۵٪	۰/۵تا۳	۰/۲تا۱/٦ میلی‌متر	۱/۱تا۱/٦
پودر سربارهٔ تصفیهٔ فولاد	نام ترکیب	سایر	FeO +P2O5	Al2O3 +MnO	CaO +MgO	SiO2 +TiO2	بازیسیته*	اندازهٔ ذرات	چگالی g/cm3
	مقدار در پژوهش حاضر	۳/۵٪	۰/۷۵٪	۳۳/٦	۵۰/٦٪	۱۱/۵٪	≈۱/۲	۱ تا ۳ میلی‌متر	≈۱/٤
پودر گرافیت	نام ترکیب	سایر	کربن				---	اندازه ذرات	چگالی g/cm3
	مقدار در پژوهش حاضر	بقیه	۹۹/۹٪				---	۱ تا ۳ میلی‌متر	۲/۱

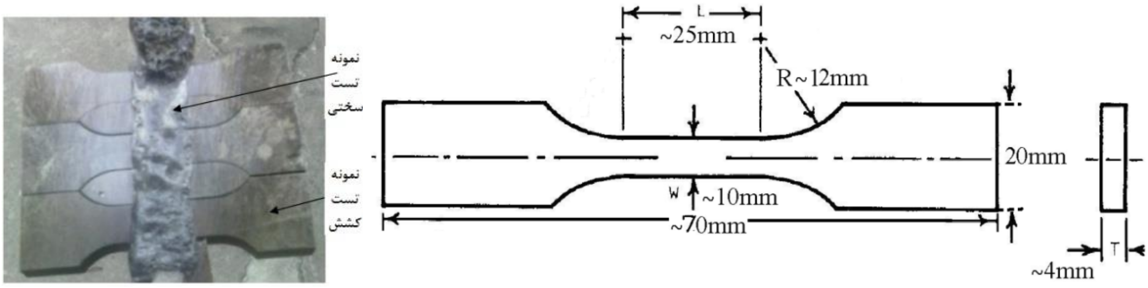
*ضریب قلیائیت (بازیسیته) بونیژوسکی



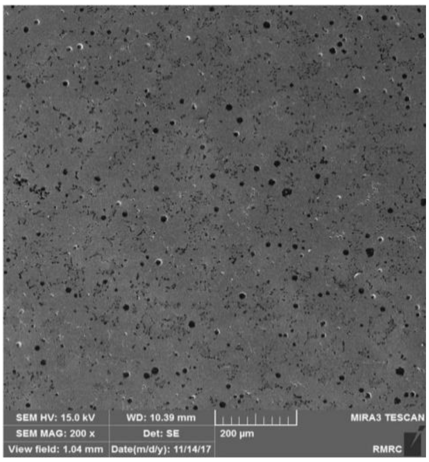
شکل ۱ پنج نمونه وای بلوک حاصل از ریخته‌گری چدن نشکن. از هر وای بلوک ۳نمونه کشش جدا می‌شود.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی و تعداد ندول گرافیت چدن نشکن مورد استفاده در پژوهش

ندول کانت گرافیت	ترکیب شیمیایی										
	آهن	کربن	منگنز	سیلیسیم	گوگرد	فسفر	آلومینیم	تیتانیم	مس	مولیبدن	کروم
≈۱٦۰ در هر میلی‌متر مربع	بقیه	۳/۷٪	۰/٦٪	۲/۵٪	۰/۰۲٪	۰/۰۵٪	۰/۰۳٪	۰/۰۱٪	۰/۰۲٪	۰/۳٪	۰/۲٪



شکل ۲ ابعاد و شکل نمونه آزمون کشش جداشده از وای بلوک جوشکاری زیرپودری‌شده



شکل ۳ ریزساختار چدن نشکن قبل از جوشکاری (خام)

جدول ۳ ترکیب شیمیایی مفتول جوشکاری زیرپودری در پژوهش حاضر DIN EN S2CrMo1 (AMA 5022)

آهن	کربن	مولیبدن	منگنز	سیلیسیم	کروم
بقیه	۰/۰۵تا۰/۱۰٪	۰/۵٪	۱/٤تا۱/۸٪	۰/۵تا۰/۸٪	۱٪



شکل ٤ مراحل انجام پژوهش

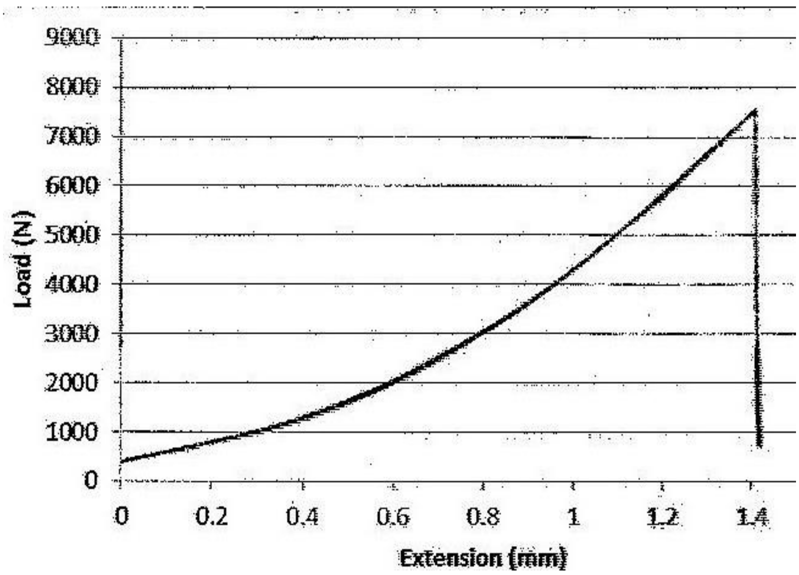
نتایج و بحث

میانگین نتایج سختی ویکرز در سه منطقهٔ متأثر از جوش، محل اتصال و فلز جوش و همچنین میانگین حداکثر استحکام کششی در جدول (٤) آورده شده است. هر دسته نمونه شامل ۳ عدد نمونه بوده است، منتهی آزمون کشش بعضی از نمونه‌ها در محدودهٔ قابل قبول نبوده است. به همین دلیل آورده نشده است. منحنی نیرو-ازدیاد طول تمام نمونه‌های شاهد، جوشکاری‌شده با پودر محافظ فاقد پودر گرافیت، جوشکاری‌شده با پودر محافظ حاوی ۱۰ درصد وزنی پودر گرافیت و جوشکاری‌شده با پودر محافظ حاوی ۲۵ درصد وزنی پودر گرافیت، به‌ترتیب در شکل‌های (۵) تا (۸) نمایش داده شده است. به‌علاوه، تصویر ریزساختار چدن نشکن قبل از جوشکاری در شکل ۹الف و مقایسهٔ تصاویر ریزساختار در سه منطقه شامل منطقهٔ متأثر از جوش، محل اتصال و فلز جوش برای نمونه‌های جوشکاری زیرپودری‌شده با پودر حاوی صفر، ۱۰ و ۲۵ درصد وزنی به‌ترتیب در شکل‌های (۹- ب تا ت) به نمایش گذاشته شده است. همچنین طیف تفکیک انرژی فازها (EDS) در ریزساختار فلز جوش نمونه‌های جوشکاری زیرپودری‌شده با پودر حاوی صفر، ۱۰ و ۲۵ درصد وزنی به‌ترتیب در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) به نمایش گذاشته شده است.

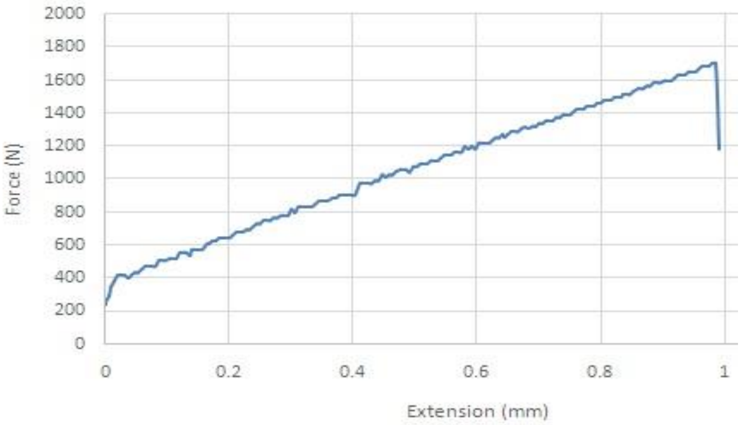
جدول ٤ میانگین نتایج سختی و استحکام کششی

ردیف	نام نمونه	میانگین سختی (ویکرز)			حداکثراستحکام کششی(مگاپاسکال)		توضیحات
		منطقهٔ متأثر از جوش	اتصال	فلزجوش	نمونه‌ها*	میانگین	
۱	شاهد (بدون جوش)	۱۶۰			۷۸و۹۲	۸۵	شکست در محدودهٔ قابل قبول
۲	پودر فاقد گرافیت	۲٦۵	۲۱۲	۲۱۸	۲۰و۹٦	۵۸	شکست در کنارهٔ جوش
۳	پودر با ۱۰ ٪گرافیت	۳۷۵	۵۱۵	۵٤۵	۷٤و۹۱و۳۰	٦۵	
٤	پودر با ۲۵ ٪ گرافیت	٤۷۱	۷۱۵	۸٤۸	۷۹	۷۹	

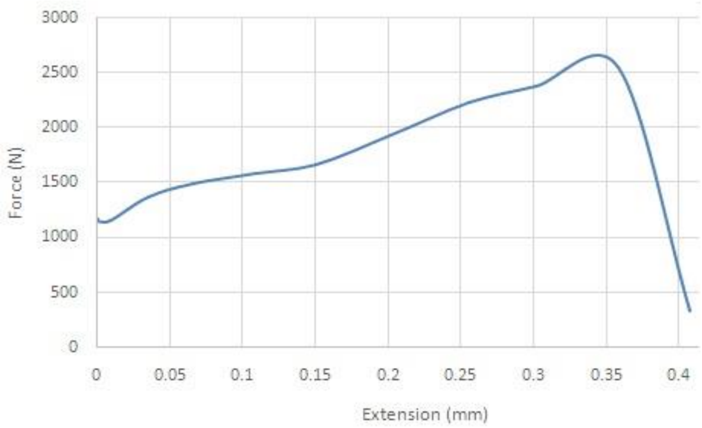
*هر دسته نمونه شامل ۳ عدد نمونه بوده، منتهی آزمون کشش بعضی از نمونه‌ها در محدودهٔ قابل قبول نبوده و به همین دلیل آورده نشده است



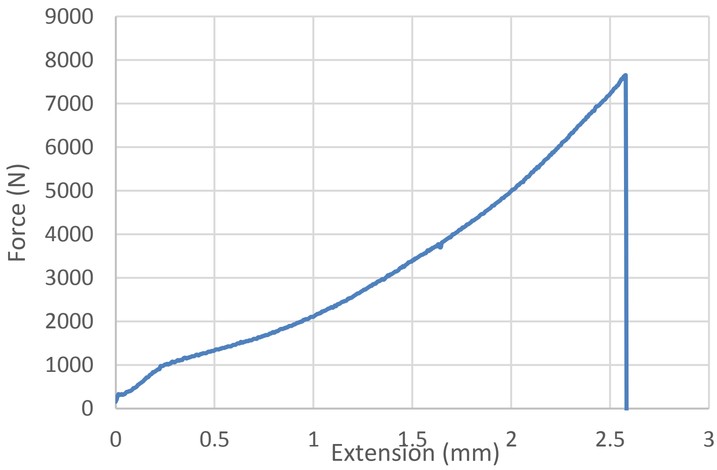
شکل ۵ نمودار نیرو-ازدیاد طول نمونهٔ شاهد



شکل ٦ نمودار نیرو–ازدیاد طول نمونهٔ جوشکاری‌شده با پودر فاقد گرافیت

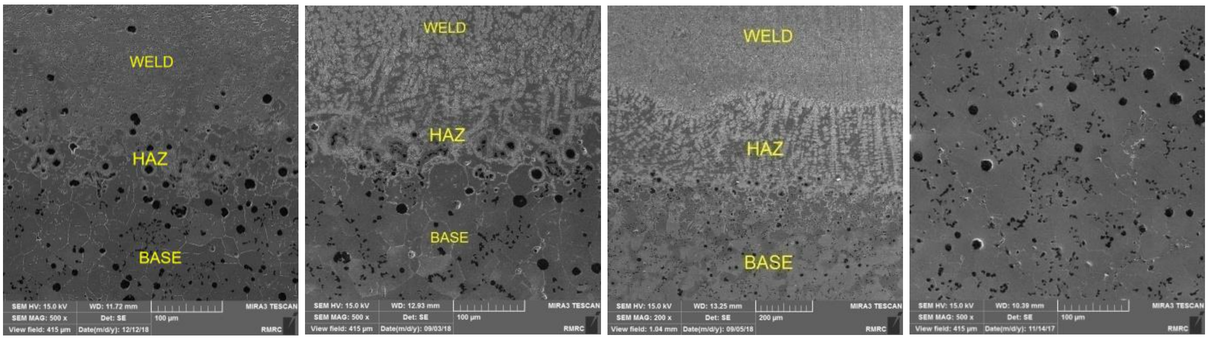


شکل ۷ نمودار نیرو–ازدیاد طول نمونهٔ جوشکاری‌شده با پودر حاوی ۱۰درصد وزنی گرافیت



شکل ۸ نمودار نیرو–ازدیاد طول نمونهٔ جوشکاری‌شده با پودر حاوی ۲۵درصد وزنی گرافیت

در ریزساختار نمونه‌ای که با پودر حاوی ۲۵ درصد گرافیت، جوشکاری زیرپودری شده است، گرافیت آزاد مشاهده شده است. در ریزساختار نمونهٔ شاهد (نمونه‌ای که جوشکاری زیرپودری نشده است، یعنی شکل (۵) نیز گرافیت آزاد وجود دارد. به همین دلیل، تشابه رفتار آزمون کشش در شکل‌های (۵) و (۸) مشاهده می‌شود.



الف–شاهد (بدون جوشکاری) ب–جوشکاری با پودر فاقد گرافیت پ–جوشکاری‌باپودربا۱۰% گرافیت ت–جوشکاری‌باپودربا۲۵% گرافیت

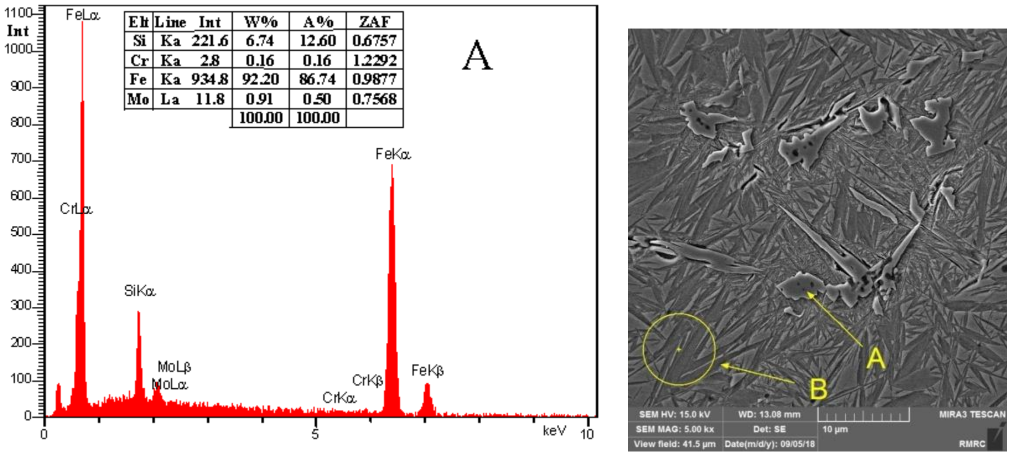
شکل ۹ تصویر ریزساختار تمام نمونه‌ها در سه ناحیه

در شکل (۹–الف) و (۹– ت) ساختار دندریتی در HAZ مشاهده نمی‌شود، درحالی‌که در شکل (۹– ب) و (۹– پ) ساختار دندریتی در HAZ مشاهده می‌شود. دلیل این مسئله را می‌توان به این نسبت داد که ترکیب شیمیایی مذاب جوش در نمونه‌ای که با پودر حاوی ۲۵ درصد گرافیت (شکل ۹ت)، جوشکاری زیرپودری شده است، به ترکیب یوتکتیک چدن (یعنی حدود ۴/۳ درصد وزنی کربن) نزدیک شده است. به‌علاوه، ترکیب شیمیایی مذاب جوش در نمونهٔ شاهد (شکل ۹– الف) یعنی نمونه‌ای که جوشکاری زیرپودری نشده است) نیز ۳/۷ درصد وزنی کربن است. اما در سایر نمونه‌ها (شکل‌های ۹– ب و ۹–پ)، مقدار کربن در مذاب جوش خیلی کمتر از ترکیب یوتکتیک چدن است زیرا مطابق جدول (۳)، مقدار کربن در مفتول جوشکاری خیلی کم (حداکثر ۰/۱ درصد وزنی) است. به همین دلیل ساختار دندریتی در HAZ مشاهده می‌شود.

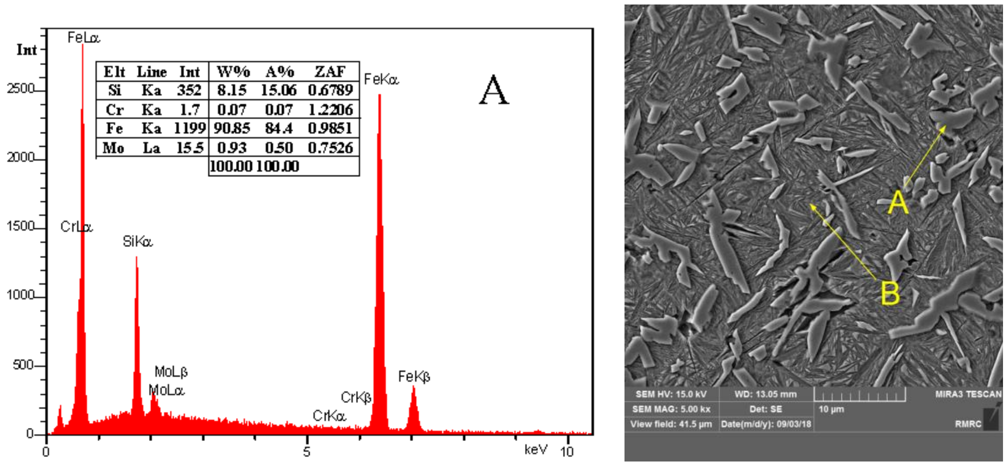
باتوجه‌به سختی بسیار زیاد در نواحی فلز جوش و محل اتصال (جدول ٤) و مطابق شکل‌های (۱۰) تا (۱۲)، طیف تفکیک انرژی فازهای غنی از سیلیسیم، کربن و آهن نمایانگر وجود فازهای بسیار سخت مانند کاربید و مارتنزیت در ریزساختار است. باتوجه‌به مقدار سیلیسیم و آهن در فاز، کاربیدها عمدتا کاربیدهای سیلیسیم و آهن بوده‌اند و گاهی کاربید کرم یا مولیبدن تشکیل شده است. زیرا مقدار کرم یا مولیبدن در مفتول جوشکاری (جدول ۲) به‌ترتیب ۱ و ۰/۵ درصد وزنی بوده است.

مطابق جدول (٤) یا شکل (۱۳)، مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار پودر گرافیت در پودر سربارهٔ تصفیهٔ فولاد از صفر به ۲۵ درصد وزنی، سختی قطعهٔ جوشکاری زیرپودری‌شده در منطقهٔ متأثر از جوش، محل اتصال و فلز جوش به‌ترتیب از ۲٦٥ به ٤٧١ ویکرز، ۲۱۲ به ۷۱٥ ویکرز و ۲۱۸ به ۸٤۸ ویکرز افزایش می‌یابد. زیرا سختی متناسب با مقدار فازهای سخت مانند کاربید و مارتنزیت است. همچنین، با افزایش مقدار پودر گرافیت شرایط برای تشکیل کاربید و مارتنزیت فزونی یافته است (زیرا کربن به‌راحتی در دسترس است)، بنابراین به‌وضوح، مقدار آن‌ها در شکل (۹– الف تا ت) به‌ترتیب افزایش یافته است.

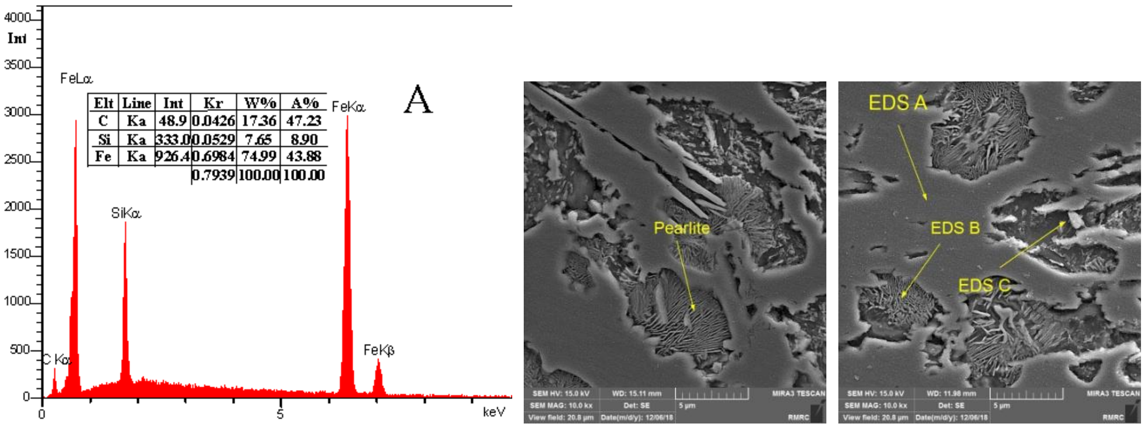
باتوجه‌به ترکیب شیمیایی چدن نشکن (جدول ۲) و ترکیب شیمیایی مفتول جوشکاری (در جدول ۳ که حاوی ۱ درصد وزنی کرم و ۰/۵ درصد وزنی مولیبدن است) و ریزساختار فلز شاهد (شکل ٥– الف)، زمینه فلز شاهد فاقد کاربید یا مارتنزیت است، بنابراین سختی آن (۱٦۰ ویکرز) نسبت به سختی فلز جوش و محل اتصال نمونه‌های جوشکاری زیرپودری‌شده (با سختی بین ۲۱۲ تا ۸٤۸ ویکرز) بسیار کمتر است. به‌علاوه، بر اثر جوشکاری زیرپودری و خنک‌کاری سریع، در ریزساختار فلز منطقهٔ متأثر از جوش، مارتنزیت تشکیل می‌شود که نسبت به فلز پایه (۱٦۰ ویکرز) موجب افزایش سختی (با سختی بین ۲٦٥ تا ٤٧١ ویکرز) شده است.



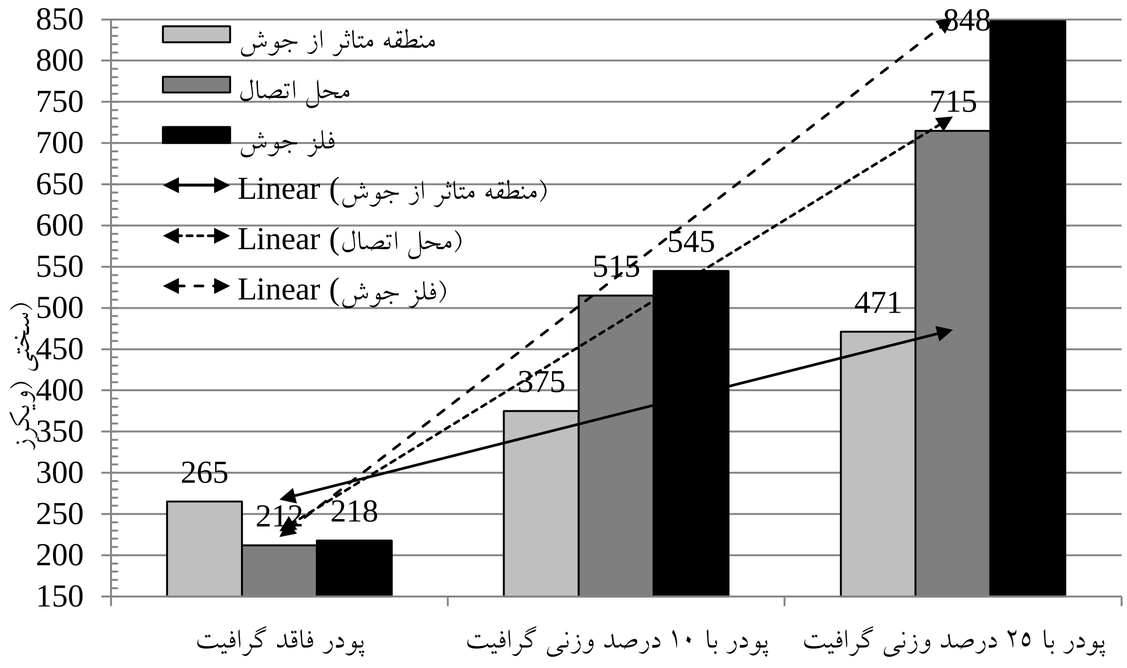
شکل ۱۰ طیف تفکیک انرژی فازهای غنی از سیلیسیم، کربن و آهن در فلز جوش نمونهٔ جوشکاری زیرپودری‌شده با پودر فاقد گرافیت



شکل ۱۱ طیف تفکیک انرژی فازهای غنی از سیلیسیم، کربن و آهن در فلز جوش نمونهٔ جوشکاری زیرپودری‌شده با پودر حاوی ۱۰ درصد وزنی گرافیت



شکل ۱۲ طیف تفکیک انرژی فازهای غنی از سیلیسیم، کربن و آهن در فلز جوش نمونهٔ جوشکاری زیرپودری‌شده با پودر حاوی ۲۵ درصد وزنی گرافیت

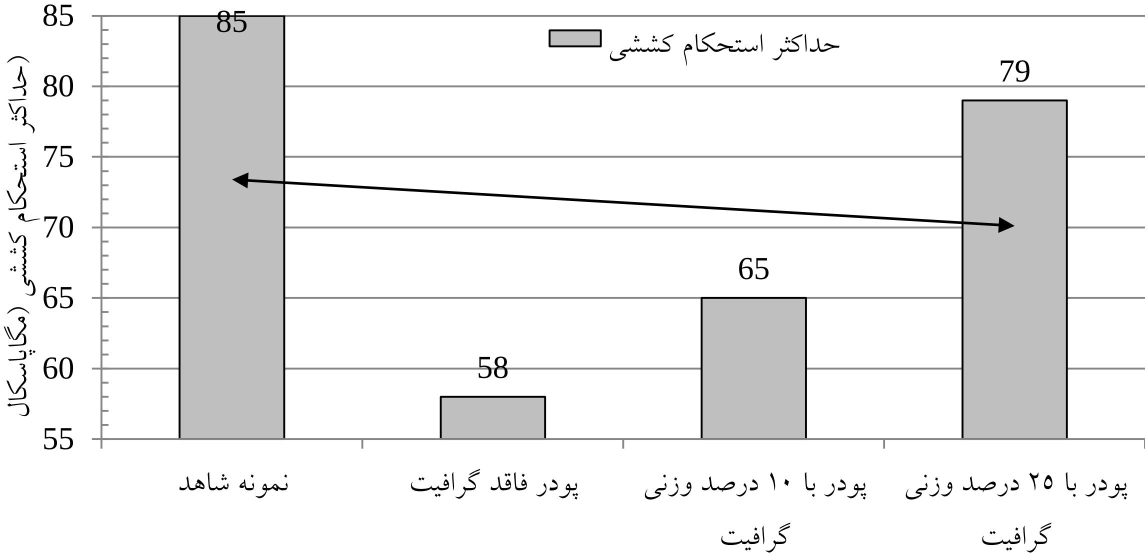


شکل ۱۳ ارتباط بین مقدار پودر گرافیت موجود در پودر سربارهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد و سختی سه منطقهٔ فلز جوشکاری زیرپودری‌شده

مکانیزم‌های احتمالی عبارت‌اند از: در اثر حرارت ناشی از قوس الکتریکی، ممکن است بخشی از سطح گرافیت ذوب شود (زیرا گرافیت نقطهٔ ذوب بالا برابر با ۳۴۰۰ درجه سانتی‌گراد دارد) و در فلز جوش حل می‌شود و به‌این‌ترتیب، غلظت کربن در فلز جوش مذاب زیاد شده و شرایط برای تشکیل گرافیت آزاد، تسهیل شده است و به‌علاوه، با افزایش مقدار کربن، تشکیل فازهای سخت لدبوریت و مارتنزیت محتمل‌تر است. همچنین، ممکن است بر اثر تنش ناشی از قوس الکتریکی، گرافیت به‌صورت تکه‌های بسیار کوچک وارد فلز ذوب و به‌این‌ترتیب، گرافیت آزاد در فلز جوش مشاهده شود.

هنگام انجام جوشکاری زیرپودری مشاهده شد که با افزایش مقدار پودر گرافیت از صفر تا ۲۵ درصد وزنی، کیفیت جوش بهتر شده است. زیرا از جدول (٤) یا شکل (١٤) مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار پودر گرافیت در پودر سربارهٔ تصفیهٔ فولاد از صفر به ۱۰ درصد وزنی، حداکثر استحکام کششی قطعه جوشکاری‌شده به‌روش جوشکاری زیرپودری از ۵۸ به ٦٥ مگاپاسکال افزایش می‌یابد اما هنوز کمتر از حداکثر استحکام کششی چدن نشکن به‌عنوان فلز پایه (۸۵ مگاپاسکال) است.

به‌علاوه، مطابق شکل (۵)، با افزایش مقدار پودر گرافیت از صفر تا ۲۵ درصد وزنی، ریزساختار منطقه تحت‌تأثیر جوش و حتی فلز جوش به ریزساختار چدن نشکن تمایل پیدا کرده است. به‌طوری‌که در شکل (۹–الف)، در چدن نشکن جوشکاری‌نشده (فلز خام یا فلز شاهد) در تمام ریزساختار گرافیت کروی مشاهده می‌شود. درحالی‌که، در نمونهٔ جوشکاری زیرپودری‌شده فاقد پودر گرافیت (شکل ۹ب) گرافیت‌های کروی فقط در فلز پایه (چدن نشکن) قابل مشاهده هستند. اما در نمونهٔ جوشکاری زیرپودری‌شده حاوی ۱۰ درصد وزنی پودر گرافیت (شکل ۹–پ) گرافیت‌های کروی تا حدی در محل اتصال قابل مشاهده هستند. همچنین، در نمونهٔ جوشکاری زیرپودری‌شده حاوی ۲۵ درصد وزنی پودر گرافیت (شکل ۹–ت) به‌وضوح گرافیت‌های کروی علاوه بر محل اتصال، حتی در فلز جوش هم قابل مشاهده هستند. به این ترتیب، افزایش حداکثر استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری زیرپودری‌شده با افزایش مقدار پودر گرافیت را می‌توان به تطابق ریزساختار فلز جوش و ریزساختار منطقه اتصال با ریزساختار فلز پایه نسبت داد.



شکل ۱۴ ارتباط بین مقدار پودر گرافیت موجود در پودر سربارهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد و حداکثر استحکام کششی فلز جوشکاری زیرپودری‌شده با نمونهٔ شاهد

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر مقدار پودر گرافیت در پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد به‌عنوان جایگزین پودر محافظ در جوشکاری زیرپودری چدن نشکن مطالعه شده است. به همین منظور، سختی و حداکثر استحکام کششی چدن نشکن قبل و بعد از جوشکاری زیرپودری با پودرهای محافظ حاوی صفر تا ۲۵ درصد وزنی گرافیت و ۱۰۰ تا ۷۵ درصد وزنی پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد مقایسه شده است. نتایج حاکی از این است که:

۱. با افزایش مقدار پودر گرافیت (از ۰ تا ۲۵ درصد وزنی) در پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد، کیفیت جوش بهتر شده زیرا حداکثر استحکام کششی فلز جوشکاری زیرپودری‌شده (به‌ترتیب از ۵۸ تا ۷۹ مگاپاسکال) به حداکثر استحکام کششی چدن نشکن شاهد (۸۵ مگاپاسکال) نزدیک‌تر می‌شود.

۲. با افزایش مقدار پودر گرافیت در پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی فولاد، مقدار فازهای سخت غنی از کربن، سیلیسیم و آهن، افزایش یافته است. به همین دلیل، سختی فلز جوشکاری زیرپودری‌شده رابطهٔ مستقیم با مقدار پودر گرافیت در پودر سربارهٔ کورهٔ تصفیهٔ پاتیلی داشته است.

۳. در چدن نشکن مورد پژوهش، فاز تقویت‌کننده حاوی ذرات گرافیت نرم، خواصی مشابه مادهٔ مرکب ایجاد کرده است. زیرا اگرچه در این پژوهش، حداقل سختی فلز جوشکاری زیرپودری‌شده از ۲۱۲ ویکرز به ۴۷۱ ویکرز و به تناظر، حداکثر استحکام کششی از ۵۸ مگاپاسکال به ۷۹ مگاپاسکال افزایش یافته است، یعنی سختی با استحکام رابطه مستقیم داشته است، **اما** نمونهٔ شاهد (جوشکاری زیرپودری‌نشده) سختی کمتر (۱۶۰ ویکرز) و استحکام بیشتر (۸۵ مگاپاسکال) نسبت به نمونه‌های جوشکاری زیرپودری‌شده دارد.

مراجع

1. ASM Handbook, "Welding, Brazing, and Soldering", *ASM International*, Ohio, USA, Vol. 6, pp. 20-26, (1993).

2. Mirhedayatian, S. M., Vahdat, S. E., Jelodar, M. J., Saen, R. F., "Welding process selection for repairing nodular cast iron engine block by integrated fuzzy data envelopment analysis and TOPSIS approaches",

Materials & Design, Vol. 43, pp. 272-282, (2013).

۳. وحدت، س.، توحیدی، ن.، "الگویِ پایشِ آلایندههایِ صنایعِ پیرو متالورژی در مناطقِ مختلف"، مهندسی متالورژی ۱۷(۵۵)، ۲۸–۳۷، (۱۳۹۳).

٤. وحدت، س. ا.، توحیدی، ن.، "توسعهٔ پایدار تولید آهن و فولاد در ایران از جنبهٔ زیست‌محیطی با استفاده از منطق شلال"، محیط شناسی، ۳۵(۵۰)، ۱۱۱–۱۲۲، (۱۳۸۸).

۵. ارزانی، ک.، حقیقی، ا.ح.، میرزاحسینی، س.ع.، "بررسی بازیافت دانه‌های تغییر شکل یافته (ضایعاتی) حاصله از مصرف پودر جوشکاری زیر پودری"، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، سال دهم (۳) ، ۷۱–۸٤، (۱۳۸۷).

6. Marandi, S. M., Ghasemi, M., Shahiri, J., "Effects of Partial Substitution of Styrene-butadiene-styrene with Granulated Blast-furnace Slag on the Strength Properties of Porous Asphalt", International Journal of Engineering, Vol. 30 (1), pp. 40-47, (2017).

۷. احمدی، ا.، فخری، م.، عاملی، ع.، آدر سی، م.، "بررسی آزمایشگاهی عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی سربارهٔ فولاد و تراشه آسفالتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال چهاردهم (۳)، ۲۳–۳۸، (۱۳۹٦).

۸. حدادی، ا .ر.، ایزدی، ا.، دیواندری، ح.، "ارزیابی تاثیر افزودنی ریزدانه‌های سربارهٔ فولاد و سنگ کوهی به‌عنوان جایگزین فیلر در مخلوط آسفالتی متخلخل"، فصلنامه جاده، ۹٦، ۱–۱٤، (۱۳۹۷).

۹. مسعودی، س.، ابطحی، م.، خوراسگانی، ا .گ.، "بررسی عملکرد بلندمدت مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی سربارهٔ فولاد کوره قوس الکتریکی"، مجله مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، سال دوم (٤)، ۲۳–٤۲، (۱۳۹۵).

۱۰. ایزدی، ج.، فراهانی، م.، زاده، ح .ی.، "خواص و مشخصات سربارهٔ فولاد کوره قوس الکتریک با ذوب آهن اسفنجی"، مجله مهندسی متالورژی، ۲ (۳)، ۱–۳، (۱۳۷۷).

۱۱. عزیزی، پ.، ادریس، ح.، "سرباره پاتیل در فرآیند فولادسازی ثانویه"، فصلنامه پیام فولاد، ٦۵، ۱۳–۲۳، (۱۳۹۵).

12. ASTM, E384, "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials", ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 1-40, (2017).